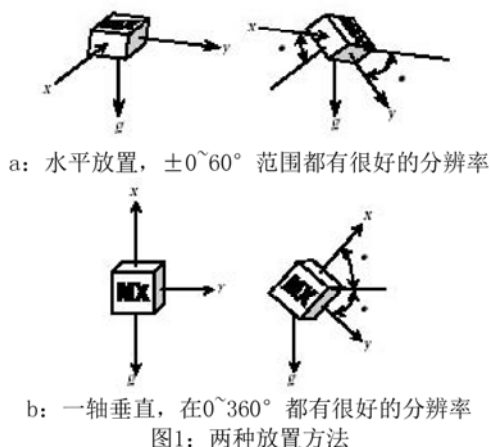


## 利用加速度传感器测量倾角

### 简介:

基于热交换原理的双轴加速度传感器具有低价位、线性度好、内置信号处理电路和温度传感器、体积小巧等优点，可测量变化或恒定的加速度。恒定加速度的一个特例就是重力加速度。当传感器静止时（没有垂直或平行的加速度），加速度传感器的灵敏轴和垂直方向的重力加速度的夹角就是倾角。

在一般设计中，加速度传感器在PCB（印刷电路板）上的初始位置要么是水平放置，要么是垂直安装。每种位置都有一个权衡的考虑，这在选择时需要考虑。



### 水平放置

在测量范围不超过 $\pm 60^{\circ}$  时，一个双轴加速度传感器可以用来测量两个方向的角度。图1 (a) 显示了当加速度传感器水平放置如何测量倾角。

为测量倾角，我们需要做一些换算，因为加速度传感器的输出仅仅是加载在传感轴上的重力加速度。参考图1 (a)，加速度传感器输出信号和角度之间的关系可由下面的公式给出：

$$Ax = g \cdot \sin(\alpha)$$

$$Ay = g \cdot \sin(\beta)$$

$Ax$ ,  $Ay$ 表示重力加速度输出， $\alpha$ ,  $\beta$ 表示倾斜角度。可以用如下公式计算倾斜角度：

$$\alpha = \sin^{-1}(Ax/g)$$

$$\beta = \sin^{-1}(Ay/g)$$

图2是SINE的曲线。当倾斜角度大于 $60^{\circ}$  时，传感器将变得不灵敏，也就是说，加速度传感器水平摆放时，如果倾斜角度接近 $90^{\circ}$ ，则倾角无法测量。

## 利用加速度传感器测量倾角

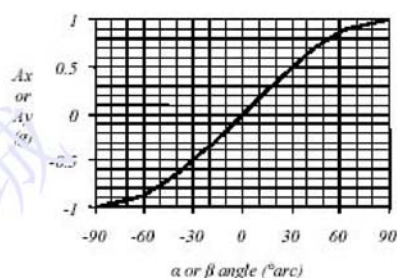


图2：加速度和倾角的关系

从上图可以看出，当角度非常小的时候，公式非常接近线性：

$$\alpha = k \cdot Ax$$

$$\beta = k \cdot Ay$$

在一些应用场合种，线性公式可以满足精度要求。表1是不同的角度使用线性近似公式计算得出的误差，要计算每个倾角的k值，需要进行曲线拟合。

倾角范围	K (°/g)	最大误差 (°)
±10°	57.50	±0.02
±20°	58.16	±0.16
±30°	59.40	±0.48
±40°	60.47	±1.13
±50°	62.35	±2.24

表1：线性近似后倾角误差

利用线性模拟，加速度传感器的灵敏度除以k就转化成倾角的灵敏度。假如加速度传感器的灵敏度是1000mV/g，倾角测量范围是±20°，则倾角的灵敏度是：

$$(1000\text{mV/g}) / (58.16^\circ / \text{g}) = 17.2\text{mV}/^\circ$$

**请注意：**对应小范围的倾斜角度，电压输出相对比较小（1° 对应17.2mV），所以在倾角传感器的设计中，要仔细考虑噪音。我公司的超低噪声加速度传感器集成有噪声滤波器，当带宽在1Hz以下时，噪声水平是1mVrms。使用这样的加速度传感器，可以保证作成的倾角传感器的输出噪声水平低于0.1°。简言之，线性近似简化了计算，只是有很小的测量误差。

## 垂直放置

当需要测量大于90° 的角度时，可以利用X，Y两个轴的加速度输出信号在0°~360° 范围内得到很好的分辨率。在这种应用中，单轴加速度信号用来测量单轴的倾角。图1（b）显示了加速度传感器从垂直位置的倾斜情况。

在图1（b）中，加速度信号和倾斜角度的关系如下：

$$Ax = g \cdot \sin(\delta)$$

$$Ay = g \cdot \sin(\gamma)$$

在上面公式中， $(\delta + \gamma) = 90^\circ$ ，所以只要知道 $\delta$ 和 $\gamma$ 值中的一个就足够了。上面的关系式也可以写成如下形式：

$$Ax = g \cdot \sin(-\gamma + 90^\circ \text{ arc}) = g \cdot \cos(\gamma)$$

两式相除可以得到:

$$[A_y/A_x] = [(g \cdot \sin(\gamma)) / (g \cdot \cos(\gamma))] = \tan(\gamma)$$

$\gamma$  角可以通过对上面的公式求反获得:

$$\gamma = \tan^{-1}[A_y/A_x]$$

对任何角度要获得好的分辨率, 垂直放置有另外的优点。通过 $A_x$ 和 $A_y$ 相除, 可以消除两个轴向上的输出误差。例如, 通过这种方法, 就不需要进行温度补偿。热交换原理的加速度传感器的灵敏度随温度的变化有很好的可预测性和重复性, 所以两轴都有相同的改变, 但经过计算后的结果则不会随温度的改变而改变。

使用微控制器可以很方便的完成信号的处理 (如图3)

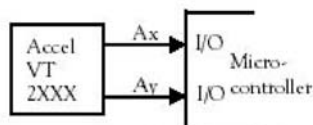


图3: 数字传感器和微控制器接口

一般, 8位的微控制器可以实现以上功能。但局限于位数的限制, 8位的微控制器没有对 $\tan$ 函数求反的功能。所以, 微控制器的编程器需要用查表或数学近似的方法 (如泰勒展开, 两项或三项多项式逼近等) 来完成对 $\tan$ 函数求反。

假设加速度传感器的输出 $A_x, A_y$ 已经获得, (通过A/D转换器或对数字输出PWM的加速度传感器使用计时器), 通过求 $\tan^{-1}$ , 就可以得到倾斜的角度。图4显示的程序就是在 $-\pi/2$ 到 $+\pi/2$ 的范围内, 对 $\arctan(\gamma)$ 函数所得值的象限判断:

```

..
..
quadrant_correct = 0;
if (Ay<0)
{ if (Ax>0)
{ quadrant_correct = +pi/2; }
else
{ quadrant_correct = -pi/2; }
}
if (Ax=0) Ax=0.000001;
angle = arctan(Ay/Ax)+quadrant_correct;
..
..

```

图4: 象限判断

## 倾角传感器的补偿

在选择信号处理方法把加速度传感器信号转化成倾角信号的时候, 许多事情需要事先考虑。每一个设计都有其系列变量, 比如: 模拟或数字系统控制接口, 倾斜角度等。图5显示了信号处理的整个过程, 但对于具体的应用, 并不是每一步都需要。

## 利用加速度传感器测量倾角

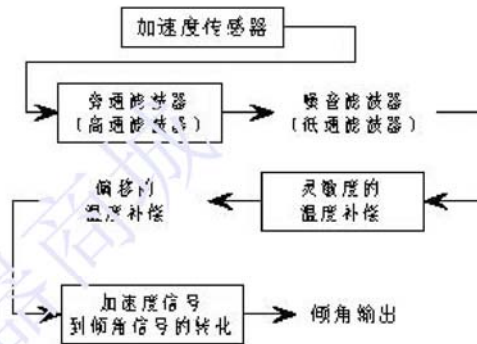


图5: 信号处理过程

在温度相对稳定的环境中应用时，而且只需要测量小角度，那么只用噪声滤波器就可以了。

当只需要测量角度的改变量时（并不需要测量实际的角度），如汽车和摩托车的安全检测，使用一个高通滤波器，就不再需要对偏移量进行温度补偿。

在大于 $90^\circ$  的场合下，如果需要高精度，则要求用噪声滤波器和零点及灵敏度进行温度补偿。